



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

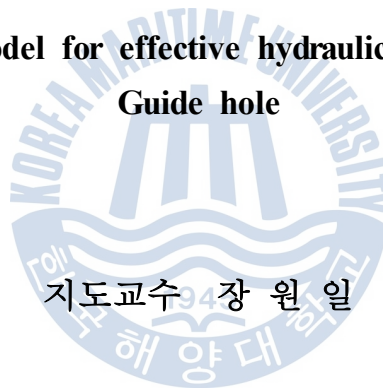
[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

유도홈을 이용한 효율적인 수압파쇄 모델 연구

A study on the model for effective hydraulic fracturing by using

Guide hole



지도교수 장 원 일

2014년 2월

한국해양대학교 대학원

해양에너지자원공학과

문 홍 주

본 논문을 문헌주의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장 윤 지 호 (인)

위 원 장 원 일 (인)

위 원 정 우 근 (인)

2014년 2월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	vi

1. 서 론	1
--------------	---

2. 기본 이론

2.1 수압파쇄	3
2.2 수압파쇄에 의한 균열발생기준	6

3. 수압파쇄시험

3.1 수압파쇄시험 장치구성	11
3.2 시료의 특성	13
3.3 수압파쇄시험편제작	14
3.4 수압파쇄시험 방법 및 결과	16

4. 수치해석 모델링

4.1 개별요소법 및 프로그램	31
4.1.1 개별요소법	31
4.1.2 3DEC	32
4.2 모델링 개요	33
4.3 해석 결과	35

5. 결론	42
참고문헌	44



List of Tables

Table 1	Property value from the laboratory test	13
Table 2	Result of hydraulic fracturing test	16
Table 3	Result of hydraulic fracturing test	23
Table 4	Strength value from laboratory test	33
Table 5	Displacement of numerical modeling results	35



List of Figures

Fig. 1	Direction of the cracks that occur during hydraulic fracturing	3
Fig. 2	Principal stress acting on the ground	4
Fig. 3	Schematic diagram of time history of fluid injection pressure showing significant pressure levels	5
Fig. 4	LEFM model	9
Fig. 5	A view of a hydraulic fracturing machine	12
Fig. 6	The lay out of test model	14
Fig. 7	Test model of production process	15
Fig. 8	Time verse load curve for model #1,2,3	22
Fig. 9	Time verse load curve for model #1,2,3	30
Fig. 10	Hydraulic fracturing test sample modeling	34
Fig. 11	Shape of the hydraulic fracturing model & grid point	37
Fig. 12	Displacement verse time for hydraulic fracturing of numerical modeling results	39
Fig. 13	Numerical modeling results	41

A study on the model for effective hydraulic fracturing by using Guide hole

Mun, Hong Ju

Department of Ocean Energy & Resources Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Hydraulic fracturing technique has been applied in various fields in order to improve the recovery of energy resources such as gas, oil and geothermal energy and research about finding out hydraulic fracturing mechanism and application has been steadily proceeded. In this study, for effective hydraulic fracturing, a scale modeling was progressed to simulate similarly with the actual site. In order to analyze the development aspect of surface cracks occurring during hydraulic fracturing followed by different conditions of the injection pressure of the fluid, the number of guide holes and the main stress conditions, hydraulic fracturing test was carried out by setting up a hydraulic fracturing test equipment. Also, through the result, we tried to derive reliable results by comparing and analyzing the value of numerical modeling which is obtained based on the physical properties and mechanical properties with 3DEC, a three-dimensional discrete element

method program. As a result, numerical analysis from discrete element method is regarded to be able to simulate well on the hydraulic fracturing test.

KEY WORDS: Hydraulic fracturing; Guide hole; Discrete Element Method; Modeling.



제 1 장 서 론

수압파쇄기술은 가스나 석유, 지열 등 에너지자원의 회수율을 향상시키기 위해 다양한 분야에서 응용되고 있으며 수압파쇄 메커니즘 규명 및 응용분야에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 왔다. Hubbert 와 Willis (1957)는 최초로 수압파쇄에 의한 균열이 발생하는 조건식을 제시한 바 있으며 그 외, 수 많은 연구에서 암반의 균열 생성 및 현지암반 초기응력 측정 기법에 적용되어 왔다.

Hubbert 와 Willis (1957)가 선형탄성모델을 기준으로 수압파쇄법을 제안한 이후, 이의 메커니즘을 보다 정확히 규명하기 위해, 공극탄성모델, 선형탄성 파괴역학모델 등을 이용한 수압파쇄 균열발생 기준식들이 제시되고 있으나, 아직 이에 대한 연구가 미진한 상태이다. 이와 관련하여 진행된 국내외 연구들을 살펴보면 Haimson과 Fairhurst(1967)는 가압 유체의 침투에 의한 공극수압을 고려한 공극 탄성 모델을 제시하였다. 또한 Zoback 외(1977)는 실험을 통해 주입되는 유체의 점도에 따른 균열개시압력(crack initiation pressure), 초기파쇄압력(breakdown pressure)의 영향을 고찰한 바 있으며, 수압파쇄 실험 시 미소파괴음 측정을 통해 파쇄 이전에 균열이 개시되는 압력을 추정하였다. Lockner와 Byerlee(1977), Ishida (2001)는 미소파괴음 측정을 통해 수압파쇄에 의해 발생하는 균열의 성장 방향을 예측하였으며, 이후 많은 연구에서 미소파괴음 측정을 통한 수압파쇄 균열의 위치 추적 및 균열 특성 분석이 이루어지고 있다. 최성웅과 이희근 (1995)은 실험을 통해 인공슬롯에 따른 수압파쇄 균열의 거동 특성을 연구 하였으며, 최성웅 (2011)은 수압파쇄 시험결과 해석에 대한 파괴역학 모델의 적용성을 검토하였다.

또한 수압파쇄 메커니즘을 규명하기 위한 또 다른 방법으로 수치해석적 연구도 다양하게 진행되어 왔으며, 유한요소법과 경계요소법 등을 사용한 기법이 복잡한 3차원 수압파쇄 해석에 주로 적용되었다. Hazzard 외 (2000), Al-Busaidi

외 (2005), Shimizu 외 (2011)는 개별요소법을 사용하여 수압파쇄 균열의 성장 매커니즘을 규명하였으며, 이 결과를 실험을 통한 미소파괴음 결과와 비교 분석하였다. 최성웅 (2000)은 유한요소법을 사용하여 rock bridges를 고려한 수압 파쇄 균열 거동을 고찰 하였으며, 최성웅 (2011)은 수치해석 기법을 통한 균열 폐쇄 압력의 정량적 산정을 위한 연구를 수행한 바 있다

생산성 향상을 위한 파쇄작업의 도입은 1900년대에 시작 되었다. 당시에는 생산층에 폭약을 사용하여 생산정 하부의 직경을 확장시키고 주변 지층을 파쇄 하였는데 작업 자체가 위험하고 폭약에 의해 케이싱을 손상시키는 문제점이 발생하였다. 이에 1940년대에는 고압의 수압을 사용하는 방법이 제안되었는데, 이 방법을 통해 생산층에 균열을 발생시키고 균열을 멀리까지 전파 할 수 있게 되었다. 균열을 발생시킨 후에 시간이 경과하면 균열내부에 존재하는 압력의 감소로 발생한 균열이 닫히게 되므로 이를 방지하기 위해 파쇄유체에 충전제와 같은 고체물질을 첨가하여 사용하였다.

파쇄작업에 대한 최적설계는 생산과정에서 매우 중요한 과정으로 인식되었고 최적설계를 위하여 파쇄작업에 의해 증진되는 생산성, 균열의 형태 등을 예측할 수 있는 수학적 이론 모델과 고가의 파쇄유체와 충전제, 기기설비에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이와 같은 과정을 통하여 발달한 수압파쇄 기술은 수평시추와 더불어 1940년대 말부터 개발되어 현재까지 꾸준히 진보해 왔으며, 대형 전통유전의 발굴 감소 및 기존 유전의 생산성 향상 방안 모색, 고유가에 따른 비전통자원개발의 경제성 확보 등으로 2000년대 들어서 현장에서 활발히 적용되고 있다. 이러한 수평시추, 수압파쇄 기술의 발전으로 최근 비전통자원개발이 전 세계적으로 급성장하고 있다(김극태 외, 2014).

따라서 본 연구에서는 효과적인 수압파쇄를 위하여 실제 현장과 유사한 상황을 구현할 수 있는 유도홀을 이용한 축소모형 실험을 통해 유도홀의 갯수와 주응력의 조건 등에 따른 수압파쇄시 발생하는 균열의 발전 양상을 분석하였다. 또한 그 결과를 토대로 물성과 역학적인 특성을 취득하여 3차원 개별요소 프로그램인 3DEC을 이용한 수치해석적 모델링 값과 비교·분석함으로써 신뢰성 있는 결과를 도출하고자 하였다.

제 2 장 기본 이론

2.1 수압파쇄

수압파쇄는 파쇄유체의 압력으로 지층에 균열을 발생시키고, 이 유체를 이용하여 균열을 확장하고, 균열지지체를 통해 생성된 균열을 유지하는 단계로 구성된다. 인공적으로 생성된 균열은 지층과 유정사이에서 가스나 석유 등의 생산 경로를 제공한다.

수압파쇄에서 길이가 길고 투과도가 양호한 균열을 발생시키기 위해서는 파쇄유체, 첨가제와 충전제(proppant)를 적절하게 선정해야 하며 주입량과 주입압력을 고려해야 한다.

수압파쇄 공법 수행시 발생하는 균열은 최소주응력 방향에 수직하게 발생한다(Hubbert and Willis, 1957). 일반적인 저류층 환경에서는 연직응력(σ_v)이 최대 주응력이 되고 최소 수평주응력(σ_{hmin})이 최소 주응력이 되므로 최대 수평응력(σ_{hmax}) 방향으로 균열이 발생하지만 천부에 위치한 저류층에서 연직응력이 최소 주응력이 되는 경우에는 수평방향의 균열이 발생 할 수도 있다(Fig. 1).

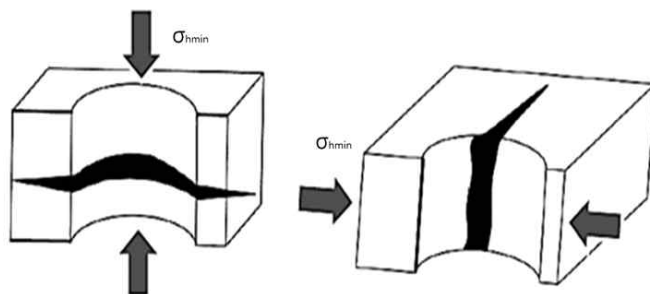


Fig. 1 Direction of the cracks that occur during hydraulic fracturing

균열을 생성시키는 방법은 대상지층의 내부마찰각을 낮게 하거나 대상지층에 작용하는 유효수직응력을 낮추면 된다. 그러나 전자는 현실적으로 힘들기 때문에 공극압력을 높여 유효수직응력을 낮춤으로써 균열을 생성시킬수 있다 (천대성 외, 2013).

지층에 대한 응력상태는 생성된 균열면의 방향을 지시하고, 방위나 생성된 균열면을 Fig. 2과 같이 지층에 작용하는 응력을 2개의 수평응력(σ_x , σ_y)과 1개의 수직응력(σ_z)로 구분해야 한다. 이때 지층에 작용하는 전체 응력은 수직, 수평응력 이외에 유체의 공극압력과 저류층압력을 고려해 주어야 한다. 여기서 공극압력은 공극 내 유체와 지층의 무게에 따라 지층에 작용하는 3가지 주요 응력의 축을 따라 발생하게 된다.

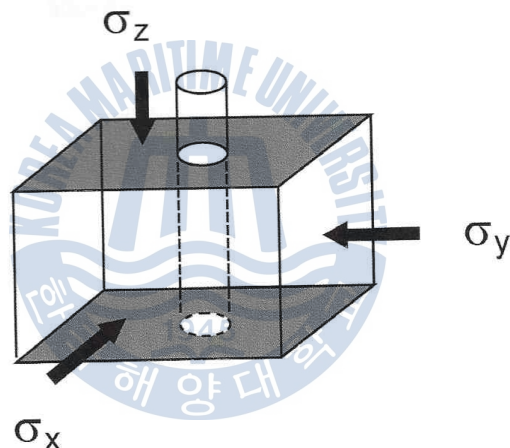


Fig. 2 Principal stress acting on the ground

파쇄를 위해 고압의 유체가 지층으로 주입되면, 인장력에 의한 암석의 파괴가 발생하면서 균열이 생성되기 시작한다. 생성된 균열의 방향은 지반의 초기 응력상태에 따라 상이하며 암석의 최소 주응력 방향으로 발생한다.

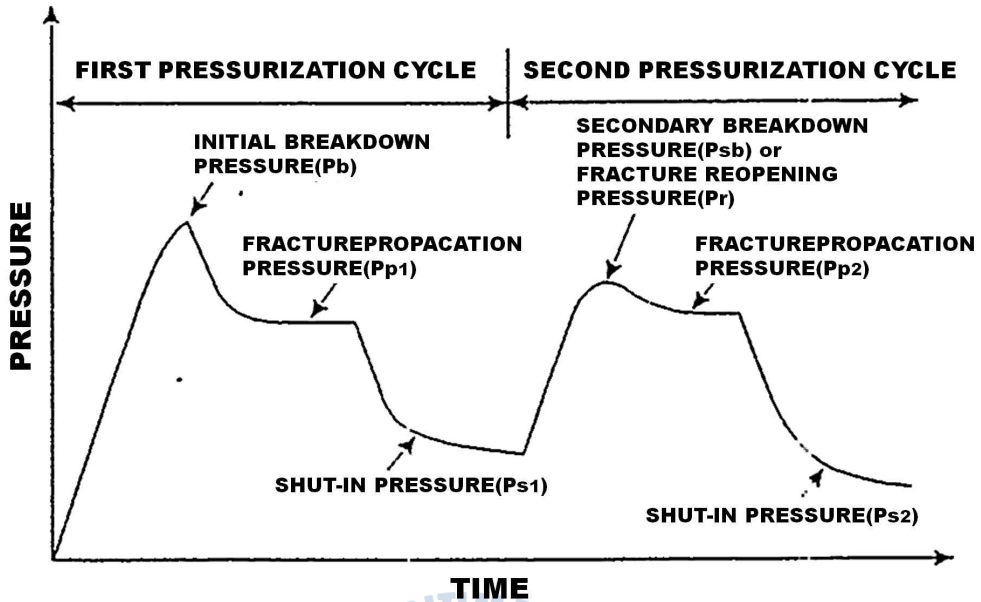


Fig. 3 Schematic diagram of time history of fluid injection pressure showing significant pressure levels(이희근, 1995)

Fig. 3은 수압파쇄에 의한 압력-시간 곡선을 나타내고 있다. 여기서 초기파쇄 압력(initial breakdown pressure) P_b 는 균열이 발생하는 순간의 압력을 의미한다. 가압을 중지하면 일정한 압력에 이르게 되는데, 이 압력이 균열폐쇄압력(shut-in pressure) P_s 이다. 이 압력은 균열을 유지시키는데 필요한 압력과 같거나 조금 크기 때문에 대개 균열면에 수직으로 작용하는 최소 수평주응력(σ_{hmin})을 나타내게 된다. 즉,

$$\sigma_{hmin} = P_s \quad (1)$$

한편, 균열폐쇄이후 다시 가압을 하면 초기파쇄압력보다는 낮은 일정 압력에 도달하게 되는데 이 압력을 2차파쇄압력(secondary breakdown pressure) P_{sb} 또는 균열개구압력(fracture reopening pressure) P_r 이라 하며, 여기서 현지암반 인장강도T를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T = P_b - P_{sb} \quad (2)$$

이때의 T 는 시추공 내에 균열이 발생한 개소의 인장강도이며, 또한 시추공 벽면의 강도는 균일하지 않으므로, 시험편에 대하여 직접인장시험 또는 압열인장시험으로 구한 인장강도와는 별도로 취급되는 것이 바람직하다.

균질 등방성이고 불투수성의 탄성체로 가정한 암반 내에 형성된 연직의 시추공에 대해 상부암반 자중에 의한 연직응력을 시추공의 축방향의 주응력으로 가정하였을 경우, 이때의 이차원적 수압파쇄조건식은 다음과 같이 주어진다 (Hubbert and Willis, 1957).

$$\sigma_p = -\sigma_{hmax} + 3\sigma_{hmin} - P_b = -T \quad (3)$$

$$\sigma_v = \gamma h \quad (4)$$

여기서, σ_p 는 시추공 벽면에 작용하는 최소점선응력(압축을 +로 함)이며, σ_v 는 연직방향의 주응력, γ 는 암반의 단위중량, h 는 지표로부터의 심도이다.

2.2 수압파쇄에 의한 균열발생기준

수압파쇄에 의한 균열발생 조건식은 각각의 설정 모델에 따라 여러 가지 형태로 나타낼 수 있는 바, 이를 일반적인 수학적 형태로 정리하여 나타내면 다음 식과 같다. 즉,

$$P_b = P_{\infty} + m_1\sigma_{hmin} + m_2\sigma_{hmax} + m_3P_o \quad (5)$$

여기서, P_o 는 초기공극압이며, m_1, m_2, m_3 는 각각의 설정 모델에 따라 주어지는 계수이다. 또한 P_{∞} 는 초기공극압이 0이고, 최대 및 최소 수평주응력이 0일 때의 균열파쇄압력(zero breakdown pressure)이다.

따라서, 각각의 설정 모델에 따라 수압파쇄 균열발생 조건식을 나타내면 다음과 같다.

(1) 선형 탄성 모델(Linear Elastic model, LE model)

Hubbert 와 Willis에 의한 모델로서, 암반은 선형 탄성적이며 균질 등방성인 연속체로서 불투성이라고 가정하였다.

$$P_b = P_{\infty} + 3\sigma_{hmin} - \sigma_{hmax} - P_o \quad (6)$$

식(6)에서 초기공극압 P_o 가 0 일 경우 이 식은 식(3)과 같은 형태가 됨을 알 수 있다. 즉, P_{∞} 는 수압파쇄에 의한 인장강도, T 와 같음을 알 수 있다. 따라서 이 모델에서는 P_{∞} 를 암반의 일정 재료상수로 가정하고 있다.

(2) 공극 탄성 모델(Poroelastic model, PE model)

Haimson 과 Fairhurst에 의하면, 수압파쇄에 의한 응력계산시 가압 유체가 암반속으로 침투함으로써 야기되는 응력까지도 포함하여야 한다고 다음과 같이 제안하였다.

$$P_b = P_{\infty} + \frac{(3\sigma_{hmin} - \sigma_{hmax} - P_o)}{A} \quad (7)$$

여기서, $A = 2 - \frac{\alpha(1-2\nu)}{1-\nu}$

ν : 암석의 poisson 비

$$\alpha = 1 - \frac{C_r}{C_b} : \text{암석의 Biot 공극탄성계수(biot poroelastic parameter)}$$

C_r : 유체의 침투를 허용하는 시험에서의 압축률

C_b : 공극압을 0으로 유지하는 시험 일정재료상수로 가정된다.

(3) 점응력 모델(Point Stress model, PS model)

Ito 와 Hayashi에 의하면, 시추공벽에서 점선응력이 임계치에 다다랐을 때 수압파쇄 균열이 발생하는 것이 아니라 시추공의 직경 d 와 암반 내로의 임의의 거리 d 사이의 영역 전체의 점선응력이 암반의 인장강도와 같거나 크게 되면 균열이 발생한다고 간주한다. 여기서 d 은 재료상수로 가정된다.

$$P_b = P_{\infty} + \frac{\sigma_{hmax}(1-3I^2)}{2} + \frac{\sigma_{hmin}(1+\frac{2}{I^2}+3I^2)}{2} \quad (8)$$

$$I = \frac{d}{d+2d} \quad (9)$$

이 모델에서 $P_{\infty} = T/I^2$ 이며, P_{∞} 는 시추공 직경의 함수임을 알 수 있다.

(4) 선형 탄성 파괴역학 모델(Linear Elastic Fracture Mechanics model, LEFM model)

Rummel 은 암반 내의 수압파쇄에 의한 균열의 형성을 모델화할 때, Fig. 4와 같이 시추공으로부터 한편의 길이가 a 이고(전체 길이는 $2a$), σ_{hmax} 방향으로 퍼져 나가는 대칭형의 양균열을 가정하였으며, 가압유체의 압력은 공벽뿐만 아니라, 기존의 균열면에도 가해지는 것으로 가정하였고 초기 공극압은 무시하였다. 또한 균열 선단 부근에서의 응력장은 복잡한 응력관계식에 의해서가 아니라, 각각의 하중단계, 즉 최대 수평주응력, 최소 수평주응력, 공내 압력, 균열면에 가해지는 압력 등의 4단계로부터 얻어지는 응력집중계수(stress intensity factor)를 중첩하여 간단히 나타내었다. 즉,

$$K_I(\sigma_{hmax}, \sigma_{hmin}, P, P_a) = K_I(\sigma_{hmax}) + K_I(\sigma_{hmin}) + K_I(P) + K_I(P_a) \quad (10)$$

여기서,

K_I : Model I 균열 전파에 대한 응력집중계수,

P : 시추공의 벽면에 작용하는 유체압력,

$P_a = P_a(x, 0) : x = (R - R)$ 에서 $x = (R + a, -R - a)$ 까지 균열을 따라 분포하는 유체압.

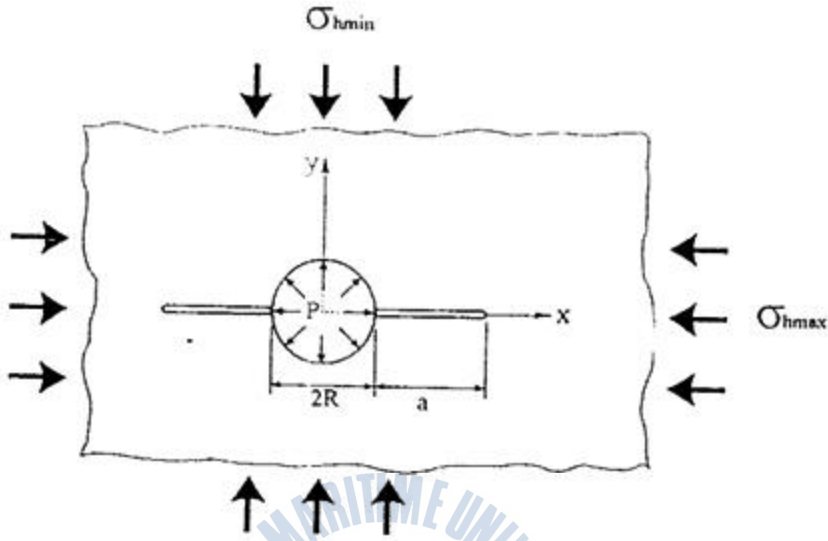


Fig. 4 LEFM model

이상의 2차원적 문제에 대하여 Boone과 ngraffea등에 의하여 여러 가지 해석적 기법 및 수치적 기법을 통한 연구가 있어 왔다. 이 중에서 비교적 간단한 접근 방법인, 무한판 내에 놓여 있는 반길이(half length) a 의 인장 균열에 있어서의 응력집중계수에 관한 일반해를 이용하는 것이다. 즉, 이 일반해는 다음과 같이 주어진다(Rummel, 1987).

$$K_I = (\pi a)^{-1/2} \int_{-a}^a \sigma_y(x, 0) \left(\frac{a+x}{a-x} \right)^{1/2} dx \quad (11)$$

여기서, σ_y : 균열면에서의 접선응력(Tangential stress)

따라서, 각각의 하중단계의 대해 접선응력함수 $\sigma_y(x, 0)$ 를 구하고, 이를 중첩하여 나타내면, 시추공 내의 응력, P_b 는 다음과 같다.

$$P_b = \frac{K_{IC}}{f(d, a)} + k_1 \sigma_{hmin} + k_2 \sigma_{hmax} \quad (12)$$

여기서,

K_{IC} : Mode I 균열전파에 대한 암석의 파괴인성(fracture toughness)

$f(d,a)$, k_1 , k_2 : 시추공의 직경 d 와 균열의 반길이 a 의 함수

식(12)을 식(5)과 비교하면 다음과 같음을 알 수 있다,

$$P_{co} = K_{IC} / f(d,a) \quad (13)$$

식(12)은 최대 및 최소 수평주응력이 0인 상태에서 측정된 암반의 수압파쇄 인장강도이며, K_{IC} 와 마찬가지로, 균열의 길이 성분인 a 도 암반의 일정 재료상수로 가정되므로, P_{co} 는 시추공의 직경의 함수로 주어진다. 따라서 식(12)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_b = P_{co} + k_1 \sigma_{hmin} + k_2 \sigma_{hmax} \quad (14)$$



제 3 장 수압파쇄시험

3.1 수압파쇄시험 장치구성

대개의 수압파쇄 모델실험에서는, 측압을 가하기 위한 수단으로서 플랫폼 또는 유압램 등이 이용되고 있으며, 이때 수평방향으로만 이축재하를 실시하는 경우가 대부분이다. 이는 연직방향, 즉 수압파쇄공과 평행한 방향으로의 재하는 수압파쇄 조건식과 무관하여, 해석에 있어서 그다지 중요한 역할을 하지 못한다는 이유와, 시험편 내로 삽입되어 있는 패커의 돌출 부분으로 인해 시험편의 상부를 재하한다는 것이 그리 쉽지 않다는 것이 그 이유이다. 따라서 이와 같은 내용을 근거로 본 실험에서는 이축재하의 수압파쇄 모델실험을 계획하였다.

실험을 수행하기 위하여 수압파쇄시험 장치를 구축하였다. 실험장치는 수압파쇄 시험을 위한 유압장치, 수압장치 및 자료처리장치로 나눌 수 있으며 수압파쇄시험의 설계에 있어 제어 가능한 유체 주입속도, 유체의 점성도, 천공, 유체유출 등을 고려하여 장치를 설계하였다.

수평방향으로 압력을 가하기 위해 4개의 원형 플랫폼을 이용하였고 시험편이 사각형의 모양인 관계로 두께 20mm의 사각형 스틸판을 이용하여 시험편에 압력을 가해주었다.

유압장치는 주입 유량을 일정하게 유지할수 있는 전기식 유압펌프를 사용하였다. 자료처리장치는 PCI-PID01 보드를 이용하여 시험편에 가해지는 측압과 유압장치에서 발생하는 압력을 변환하여 기록하였다. 제작된 수압파쇄시험장치의 모습은 Fig. 5와 같다.

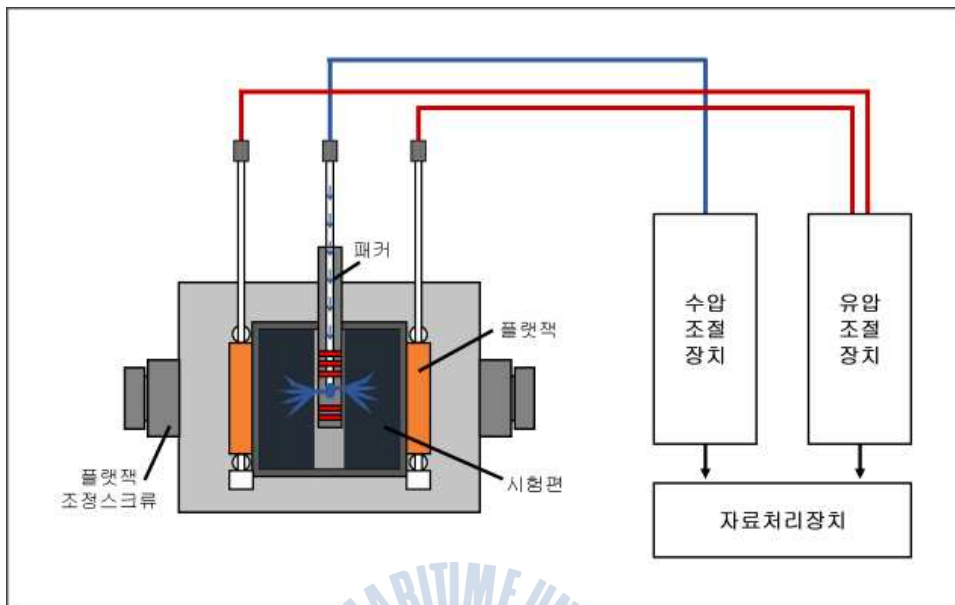


Fig. 5 A view of a hydraulic fracturing machine

3.2 시료의 특성

본 연구에서 사용된 시험편은 인공 모의 암체로서 시멘트 모르타르를 사용하였다. 실험에 사용되는 시험편은 클수록 외부조건에 따라 발생하는 물리적 변화량의 측정과 모니터링이 용이하나 제작상의 어려움과 적용되는 하중조건이 크게 증가하기 때문에 제반 조건을 종합적으로 고려하여 시멘트 모르타르 시험편을 제작하였다. 시멘트 모르타르는 1종 포틀랜드 시멘트(KS L 5201)를 사용하였으며, 시험편은 시멘트와 물의 중량혼합비를 1:0.4로 양생기간을 3일로 하였다. 기초물성을 측정한 결과는 Table 1과 같다.

Table 1 Property value from the laboratory test

Property	Value
Uniaxial compressive strength(MPa)	28
Brazilian Tensile Strength(MPa)	2.34
Porosity(%)	6.90
Density(kg/m ³)	1955
Poisson's ratio	0.25

3.3 수압파쇄시험편 제작

시험편 중앙에 직경 26mm의 시험편을 관통하는 홀을 만들어 수압파쇄공을 모사하고, 유도홈이 있는 시험편과 없는 시험편을 제작하였다.

시료성형틀을 사용하여 유도홈의 길이가 좌, 우 각각 13mm 높이가 10mm가 되도록 수압파쇄시험편을 제작하였다. Fig. 6은 유도홈을 포함한 시험편을 설계한 모습이다. 각 시험편은 200mm×200mm×200mm의 정육면체 모양이 되게 제작하였다. 시험편의 제작과정은 Fig. 7과 같다.

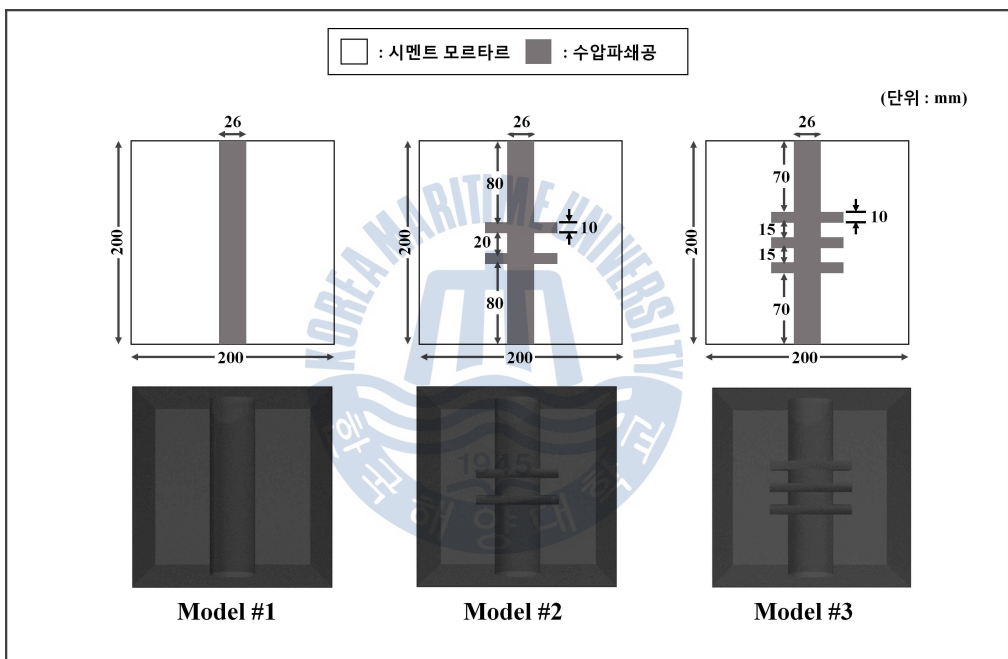


Fig. 6 The lay out of test model

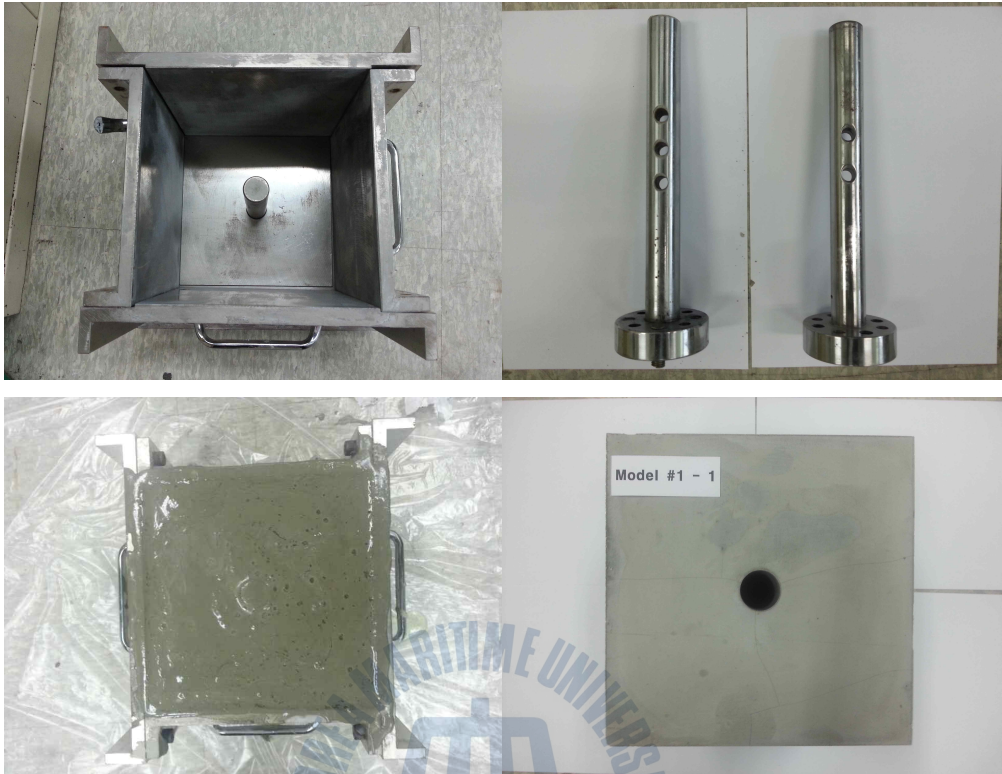


Fig. 7 Test model of production process



3.4 수압파쇄시험 방법 및 결과

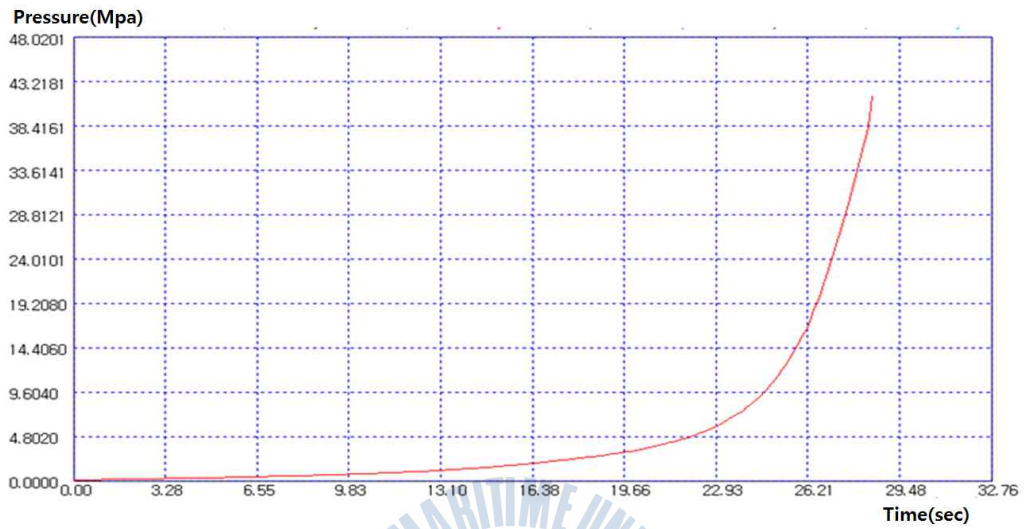
유도홈이 있는 경우와 없는 경우의 수압파쇄시 균열 발전양상을 파악하기 위해 유도홈을 만들어 수압파쇄 실험을 하기에 앞서, 유도홈이 없는 일반적인 모델에서 수압파쇄에 의한 균열의 발전양상을 확인하였다. 시험편 model #1은 유도홈이 없는 경우로 시험편 중앙에는 직경 26mm, 길이 200mm의 시추공만 존재한다. 시험편에 가해지는 측압은 2.5MPa로 일정하게 유지 시키면서 패커에는 100ml/min의 일정 주입속도로 물을 주입하였다. 유도홈이 있는 모델(model #2, model#3)은 높이가 10mm인 유도홈을 각각2개, 3개씩 만들어 수압파쇄시험을 실시하였다.

시험의 정지 기준을 최대주입압력의 90%로 설정을 한 실험모델에 대한 수압파쇄 결과는 Table 2과 같이 나타났으며 각각에 대한 균열발생 압력 그래프는 Fig. 8과 같다.

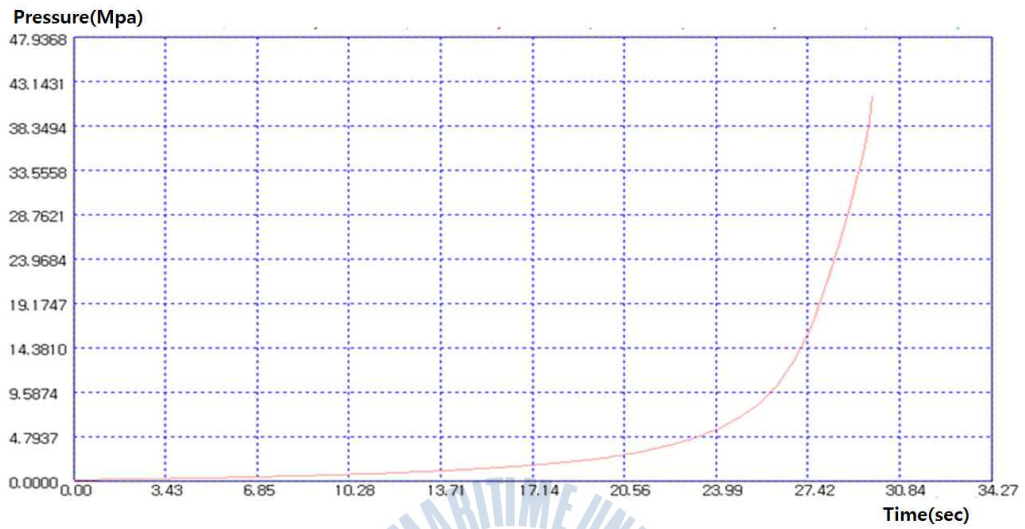
Table 2 Result of hydraulic fracturing test

	Guide hole	Side pressure (MPa)	Maximum pressure (Mpa)	Maximum flow rate (ml)	Time (sec)	Flow rate / Time (ml/min)
Model #1	0	2.5	40.29	144.32	28.49	303.94
		2.5	40.24	151.00	29.81	303.92
Model #2	2	2.5	7.88	341.81	201.95	101.55
		2.5	8.37	362.82	216.34	100.62
Model #3	3	2.5	6.94	727.34	432.60	100.88
		2.5	7.14	309.02	185.27	100.08

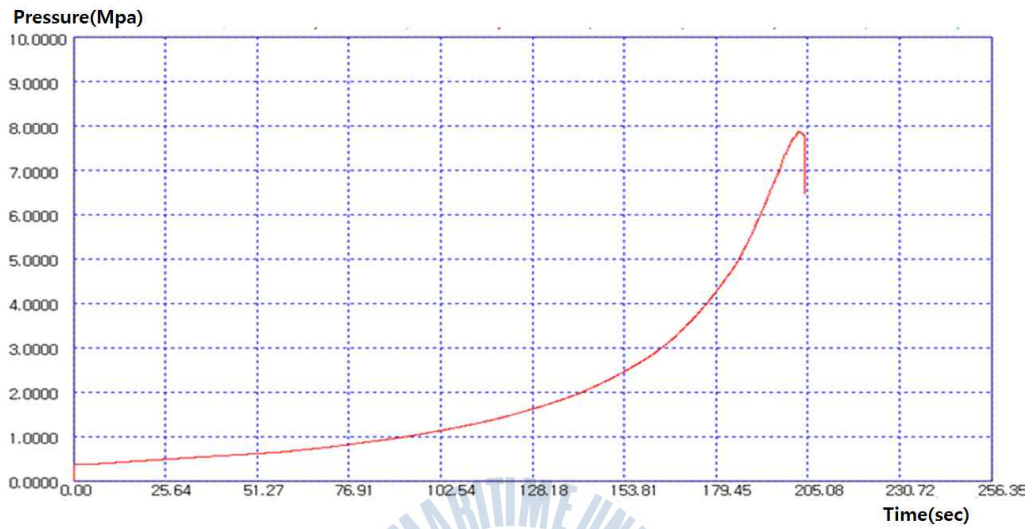
Model #1 (a)



Model #1 (b)



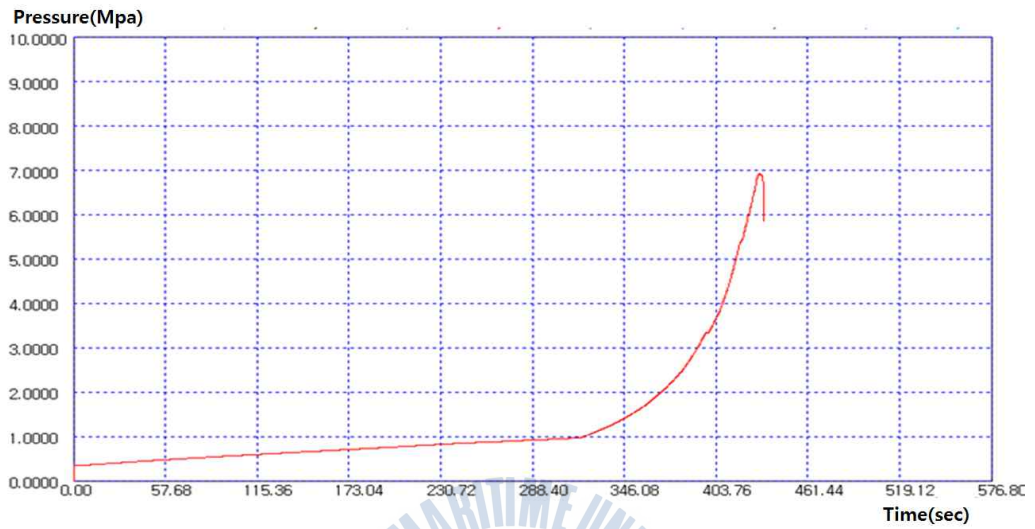
Model #2 (a)



Model #2 (b)



Model #3 (a)



Model #3 (b)



Fig. 8 Time verse load curve for model #1,2,3

최대압력을 균열발생 압력이라 하였을 때 유도홈이 없는 경우는 40.27Mpa까지 나타 났으며, 유도홈이 2개인 경우 8.13Mpa, 유도홈이 3개인 경우 7.04Mpa로 낮게 측정되었다. 이를 통해 유도홈이 있을 경우 균열 발생압력이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 패커에 주입되는 유량을 일정하게 조절을 하였지만 유도홈의 수가 증가 할수록 시험에 사용되는 전체 유량이 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 패커를 통해 흘러나온 유체가 유도홈 부분을 채우고 시험편에 압력이 가해지기 때문에 측정되는 최대 유량이 증가 한 것으로 예상된다.

즉, 유도홈에 의해 균열발생의 원인이 되는 고압수가 접촉하는 면적이 증가할수록 균열발생압력이 낮아진다.

시험의 정지 기준을 최대주입압력의 70%로 설정을 한 실험모델에 대한 수압파쇄 시험에 대한 결과는 Table 3와 같이 나타났으며 각각에 대한 균열발생 압력 그래프는 Fig. 9과 같다.

Table 3 Result of hydraulic fracturing test

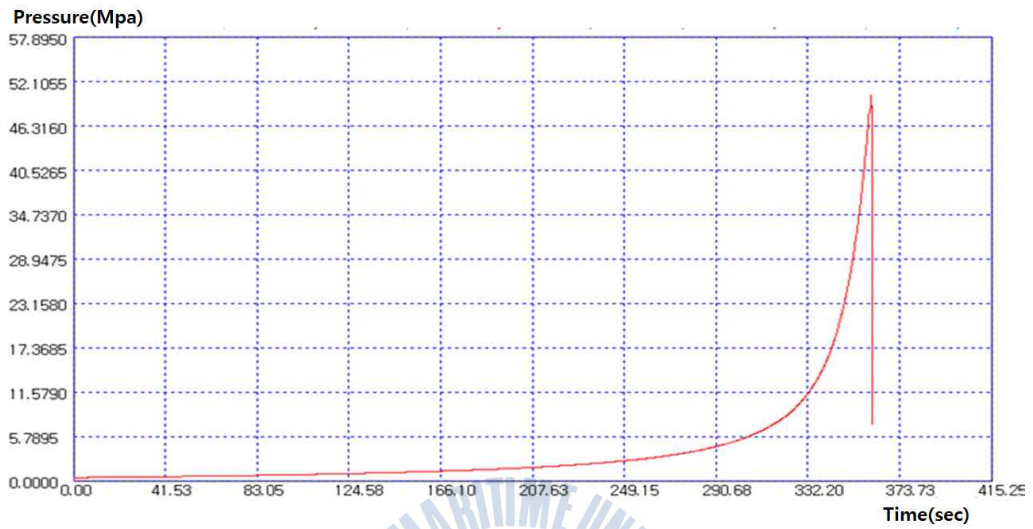
	Guide group	Side pressure (MPa)	Maximum pressure (Mpa)	Maximum flow rate (ml)	Time (sec)	Flow rate / Time (ml/min)
Model #1	0	2.5	50.35	609.41	361.27	101.21
		2.5	57.43	318.65	189.08	101.12
Model #2	2	2.5	64.67	135.29	80.38	100.99
		2.5	46.38	129.65	77.19	100.77
Model #3	3	2.5	49.49	135.67	80.63	100.96
		2.5	43.77	143.89	85.95	100.45

최대주입압력을 90%로 시험하였을 때 유도홈이 없는 model #1의 균열개시 최대유량/시간은 303.93ml/mim, 유도홈이 있는 model #2, #3의 최대유량/시간은

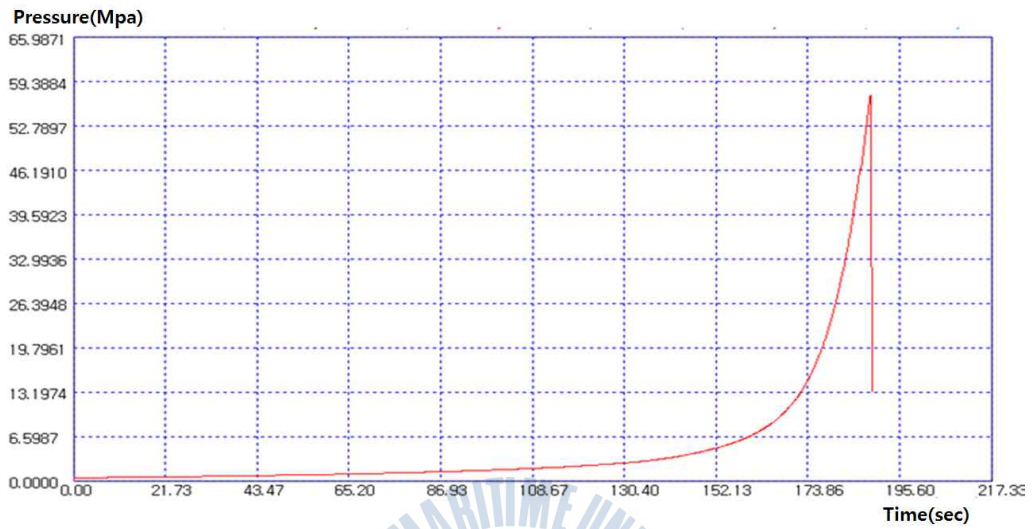
주입속도와 거의 일치하며, 최대주입압력을 70%로 했을 겨우 유도흡이 있는 model #2, #3은 주입속도와 거의 일치하나 유도흡이 없는 model #1의 경우 조금 높게 나타났다. 따라서, 유도흡이 없는 경우는 최대주입압력을 높게 설정하는 것이 바람직하다고 판단되며, 유도흡이 있는 경우는 최대주입압력 설정과는 무관하다는 것으로 생각된다.



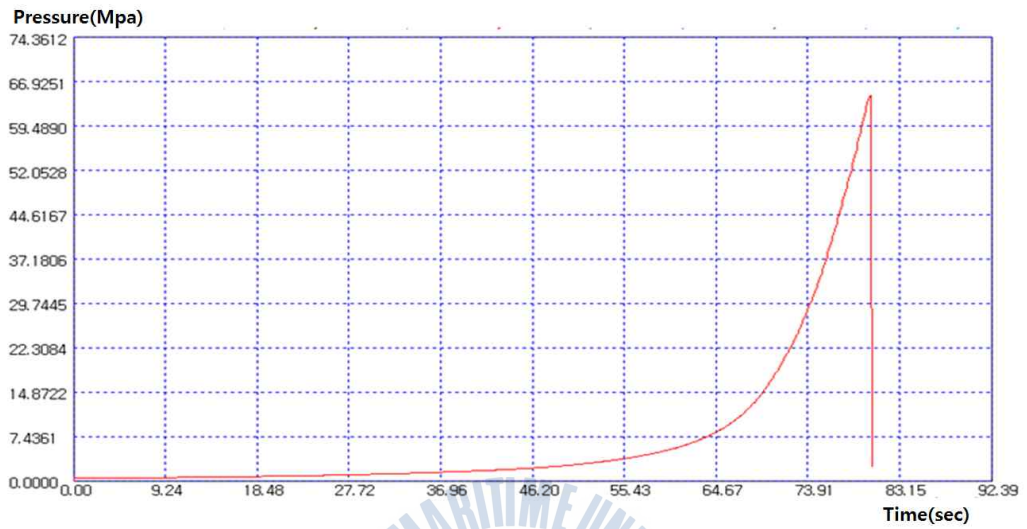
Model #1 (a)



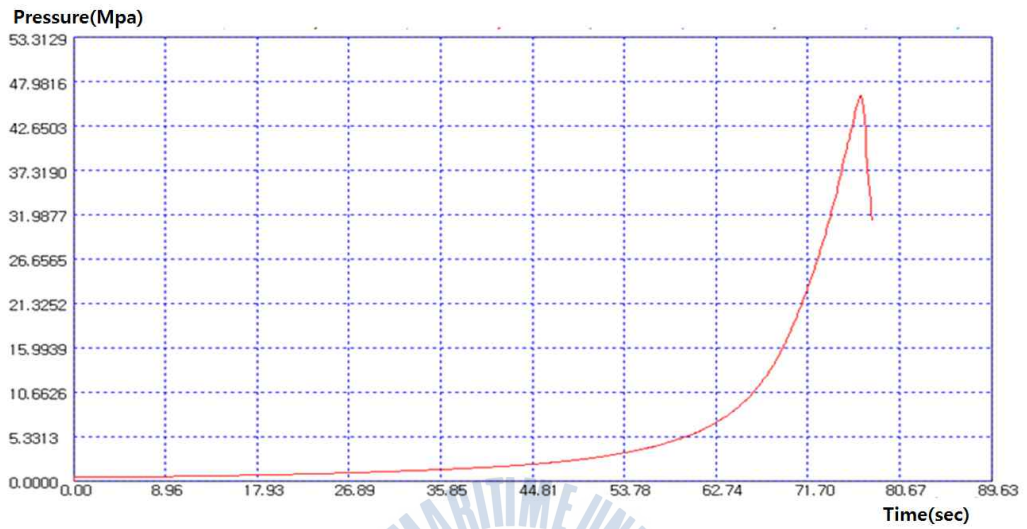
Model #1 (b)



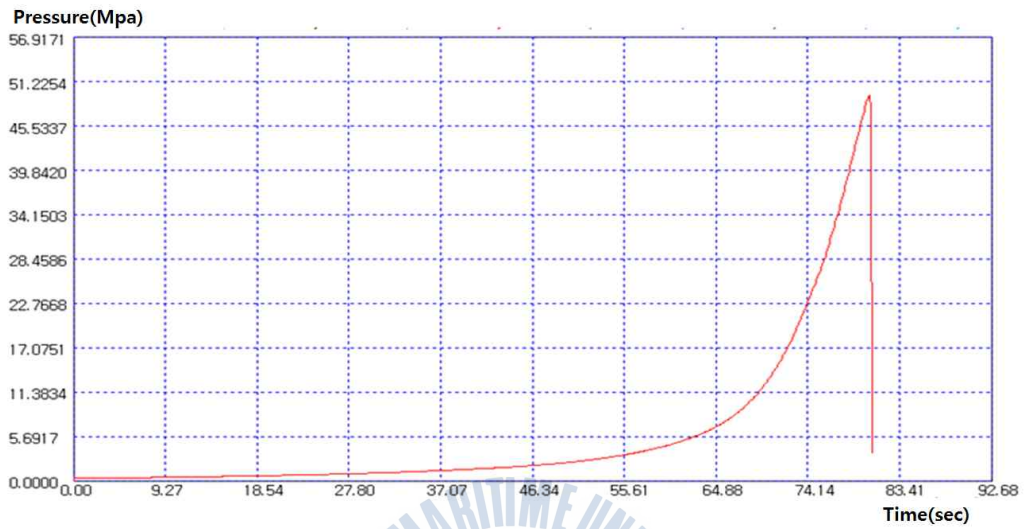
Model #2 (a)



Model #2 (b)



Model #3 (a)



Model #3 (b)

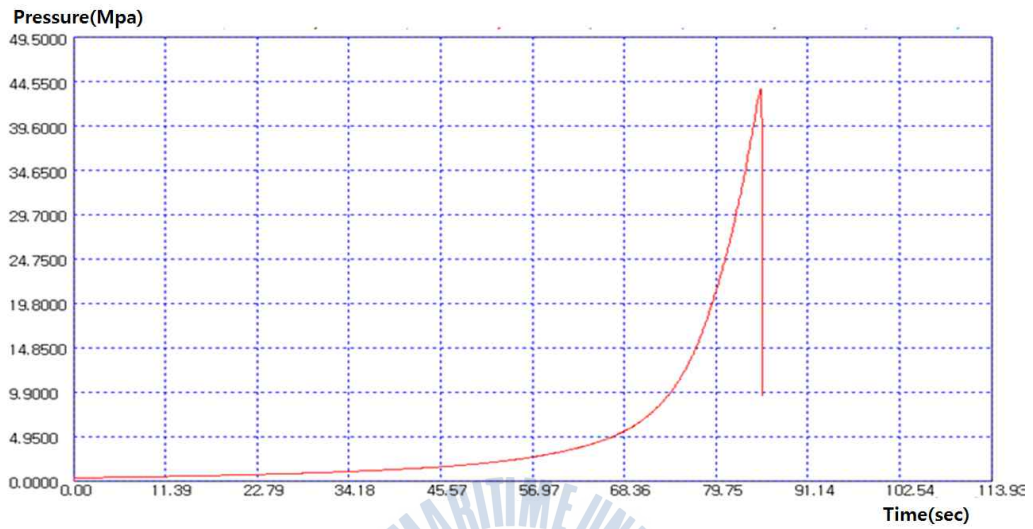


Fig. 9 Time verse load curve for model #1,2,3

제 4 장 수치해석 모델링

4.1 개별요소법 및 프로그램

4.1.1 개별요소법 (Distinct Element Method, DEM)

암반공학 분야에서의 수치해석 모델링은 크게 연속체 해석과 불연속체 해석의 방법으로 구분할 수 있다. 이러한 기법들은 절리나 단층과 같은 불연속면들을 암시적으로 포함하는가, 혹은 명시적으로 포함하는가에 따라 가장 큰 차이를 가지게 된다. 현지 암반은 초기응력과 지각운동에 의해 생성된 다양한 구조적인 불연속면(절리, 층리, 단층 등)들을 포함하고 있으며, 이들 불연속면은 주변 블록에 비해 낮은 강도 특성 및 높은 투수성을 가짐으로써 암반의 역학적, 수리적 거동을 좌우한다. 즉 절리와 같은 불연속면이 발달된 암반의 역학적 거동은 암석 자체의 역학적 특성보다는 불연속면의 특성에 의해 더 영향을 받는다.

이러한 불연속면의 특성을 효과적으로 고려할 수 있는 개별요소법은 지반을 연속체로 간주하는 유한요소법(finite element method), 유한차분법(finite difference method) 등의 수치해석법과는 달리 불연속체 모델을 이용하는 해석법이며, 지반을 개개의 강성 블록으로 설정하여 불연속체의 모델링 경우 매우 효율적이어서 불연속 암반을 위한 새로운 수치해석방법으로 정착되어가고 있다.

개별요소법의 개발과 수식화는 Cundall이 처음 제안한 방법으로 암반의 공학 문제들을 풀 수 있는 효과적인 수치해석 기법으로 인식되고 있다. 불연속면 사이의 접촉면의 특성을 나타내기 위하여 절리의 강성을 고려하였고, 운동방정식

을 수치적분하기 위하여 명시적 유한차분법(explicit finite difference method)을 사용하는 것이 그 특징이다.

개별요소법의 계산은 모든 접촉면의 힘-변위 법칙과 모든 블록의 뉴턴 제 2 운동법칙을 번갈아 수행한다. 힘-변위 법칙은 알려진 변위로부터 접촉력을 찾는데 사용되고, 뉴턴 제 2운동법칙은 블록에 작용하는 알려진 힘으로부터 발생된 블록의 이동을 계산한다. 만약 블록이 변형 가능하면, 이동은 블록 내의 삼각형 유한-변형을 요소의 절점에서 계산된다. 그때, 블록재료 구성관계의 적용은 요소 내에 새로운 응력을 부여한다(한국암반공학회, 2005).

4.1.2 3DEC (3 Dimensional Distinct Element Code)

본 연구에서 사용한 수치해석 프로그램인 3DEC(3 Dimensional Distinct Element Code)은 불연속체 모델링을 위한 개별요소법에 기초한 3차원 수치해석 프로그램으로 static 혹은 dynamic 하중에 놓여있는 절리 암반과 같은 불연속 매질의 반응에 따른 시뮬레이션이 가능하다. 개별 블록들은 강체나 변형이 가능한 블록으로 거동 가능하고, 변형가능한 블록들은 유한차분 요소들로 세분화된다. 각 요소들은 미리 결정된 선형 혹은 비선형의 응력-변형을 관계 법칙에 의하여 반응하게 되며, 불연속면들의 상대적 운동은 수직과 전단 방향의 운동에 대한 선형 혹은 비선형 힘-변위법칙에 의해 지배된다. 3DEC은 대규모 운동과 블록 시스템의 변형을 모델링하는데 적합한 “Lagrangian”계산법에 기초한다(Itasca consulting, 2007).

4.2 모델링 개요

개별요소법에 기초한 3차원 수치해석 프로그램 3DEC을 이용하여 수압파쇄시험을 모델링하였다. 수압파쇄시험과 동일한 조건을 나타내기 위해 Fig. 10와 같이 각각의 모델을 설계하였다.

수치해석 모델링에 사용된 물성값은 기초물성 측정 및 일축압축강도, 압열인장강도 등을 이용하여 구하였으며 그 결과는 Table 4와 같다

시험모델편은 deformable body로 제작하여 압축 및 팽창이 가능하게 하였고 시험편 내에 압력이 가해졌을 때 변위의 파악이 가능하도록 모델링 하였다.

Table 4 Strength value from laboratory test

Property	Value
block mass density	1955 kg/m ³
bulk modulus of block	22.43 GPa
shear modulus of block	13.46 GPa
friction angle of block	57.75°
cohesion of block	4.05 MPa
tensile strength of block	2.34 MPa

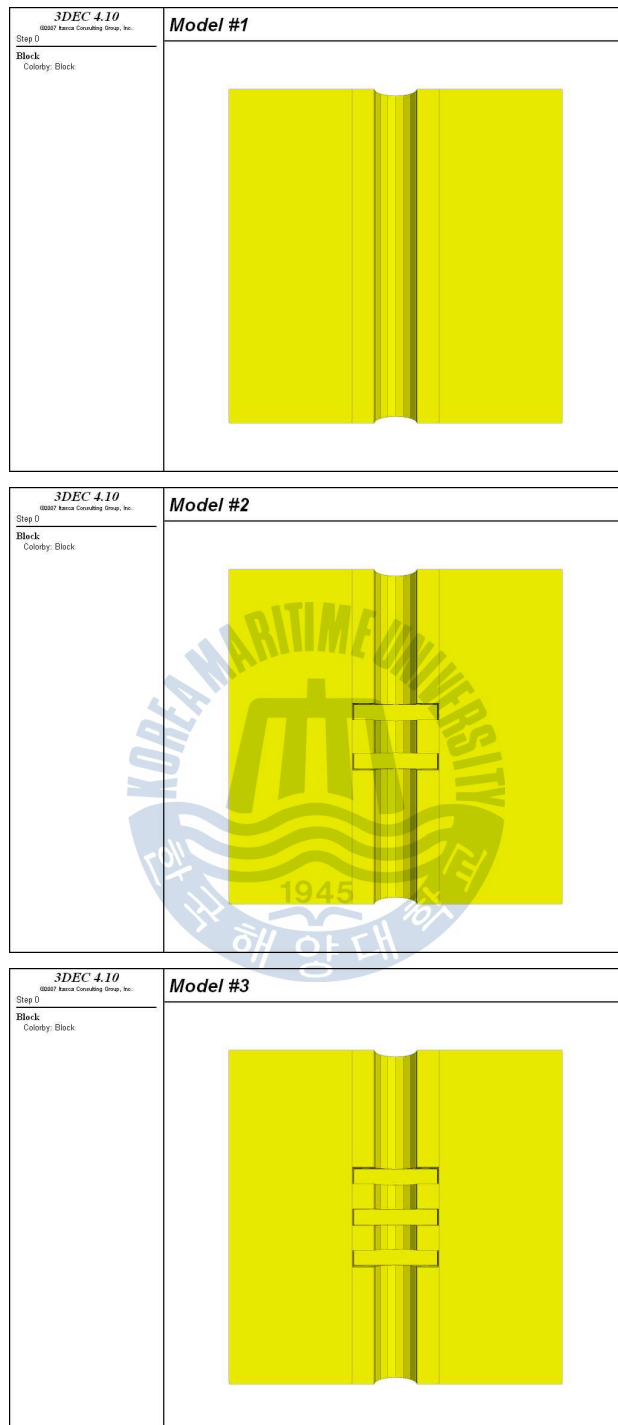


Fig. 10 Hydraulic fracturing test sample modeling

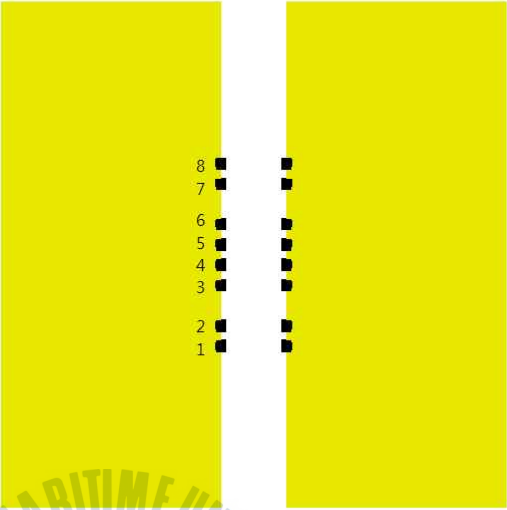
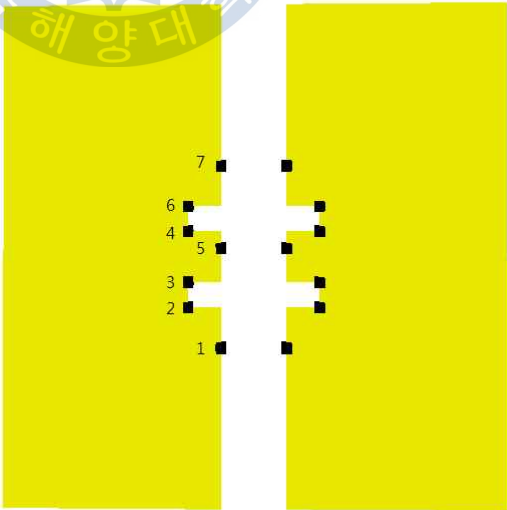
4.3 해석 결과

모델링한 수압파쇄 시험모델편의 형상과 변위를 파악하기 위한 grid point는 Fig. 11과 같으며, grid point는 패커의 위치를 고려하여 패커의 최하단부와 유도홈의 벽면, 유도홈과 유도홈 사이에 배열하여 각 지점의 변위 분포 결과를 파악하고자 하였다. 각 지점에서의 발생된 변위는 Fig. 12와 같이 나타난다.

발생된 변위를 살펴보면 Table 5에서와 같이 유도홈이 없는 model #1의 경우 노즐외곽에서 최대변위(21.06mm, 21.86mm)가 발생하며 패커에 가까울수록 감소한다. 유도홈이 2개인 model #2의 경우 패커의 최하단부에서 10.28mm, 유도홈 벽면에서 발생하는 변위 12.56mm, 유도홈과 유도홈 사이에서는 13.49mm로 유도홈과 유도홈 사이에서 최대치를 나타내고 있다. 유도홈이 3개인 model #3의 경우도 유도홈과 유도홈사이 4, 7 grid point에서 최대변위 (16.96mm, 18.43mm)가 발생한다. 따라서 유도홈 개수가 증가할수록 균열발생의 효율이 높아질 것으로 사료된다.

Table 5 Displacement of numerical modeling results

Model #1		Model #2		Model #3	
Point	Displacement (mm)	Point	Displacement (mm)	Point	Displacement (mm)
1	14.26	1	10.28	1	7.39
2	18.58	2	8.79	2	6.52
3	21.06	3	12.56	3	12.14
4	6.03	4	11.43	4	16.96
5	10.23	5	13.49	5	7.88
6	21.86	6	8.89	6	5.99
7	18.44	7	9.92	7	18.43
8	13.77			8	10.22
				9	6.32
				10	7.15

<p>3DEC 4.10 ©2007 Itasca Consulting Group, Inc.</p>	<p>Model #1</p> 
<p>3DEC 4.10 ©2007 Itasca Consulting Group, Inc.</p>	<p>Model #2</p> 

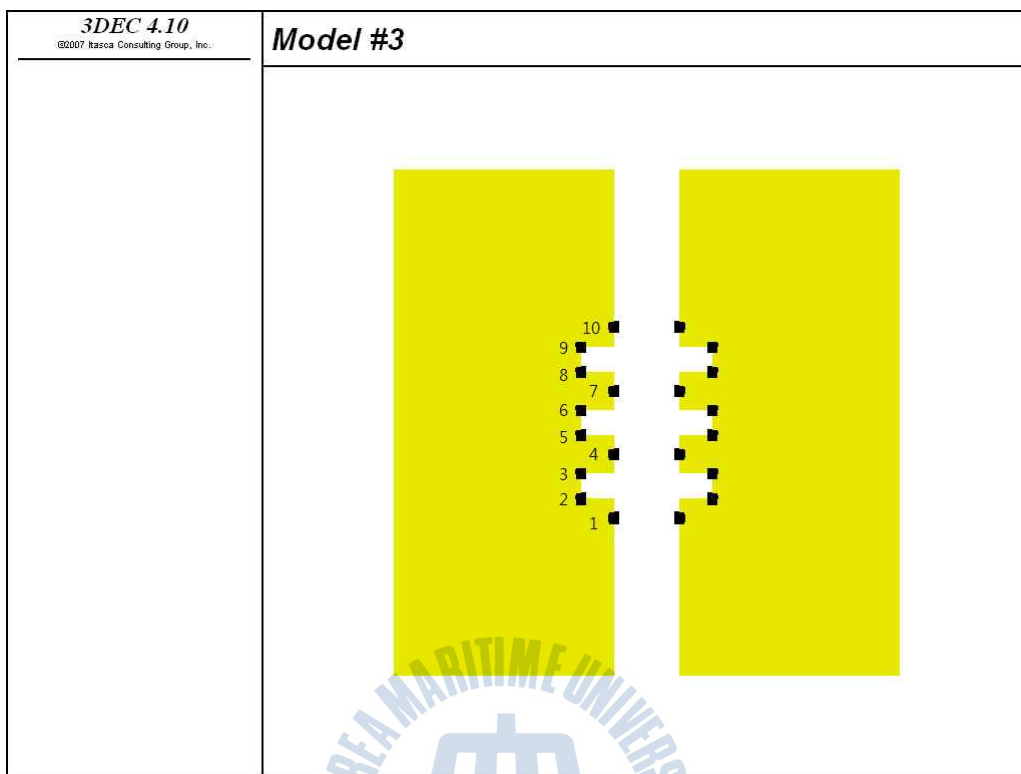
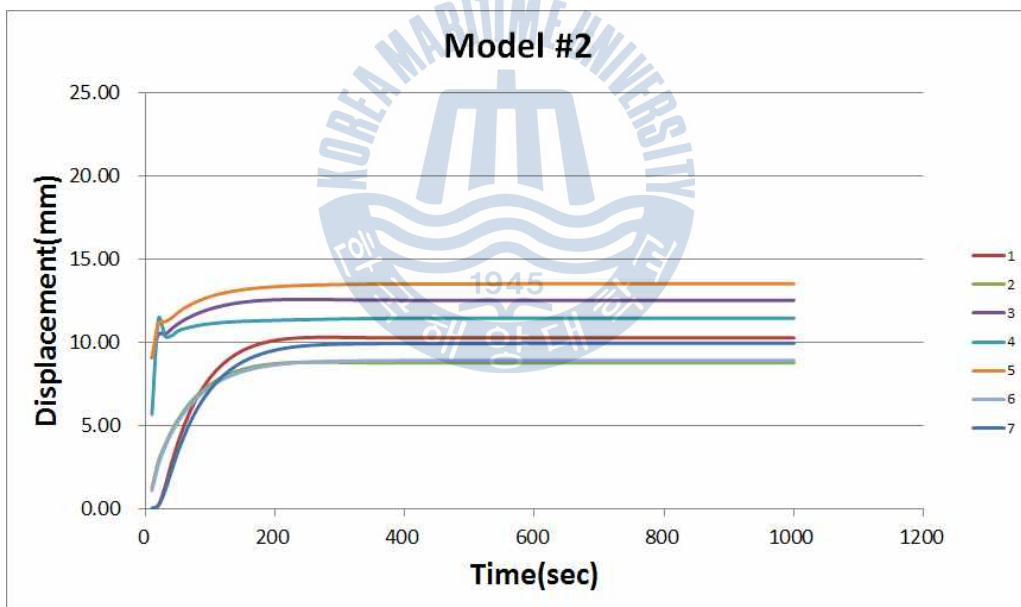
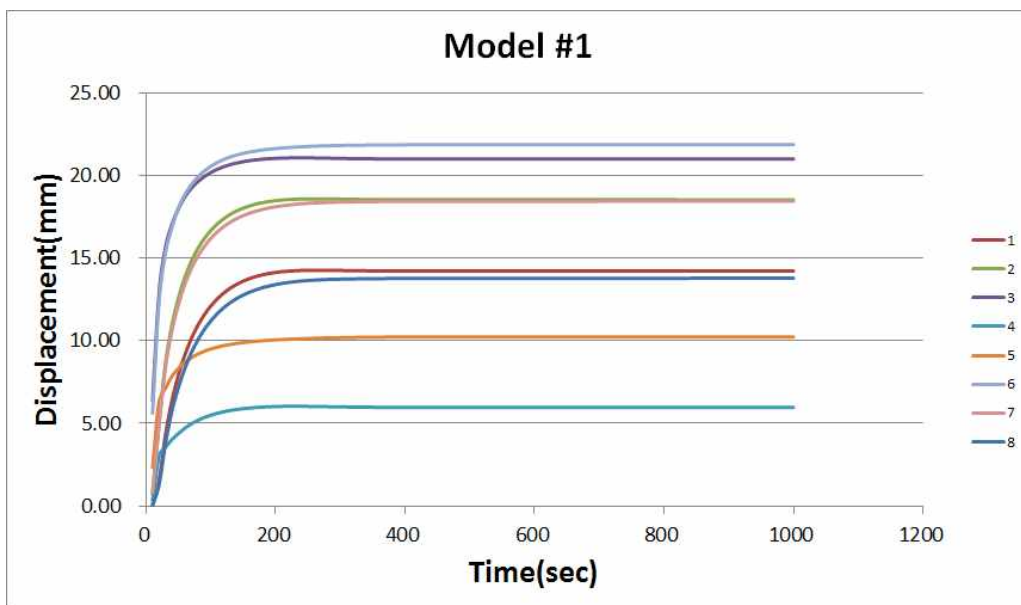


Fig. 11 Shape of the hydraulic fracturing model & grid point



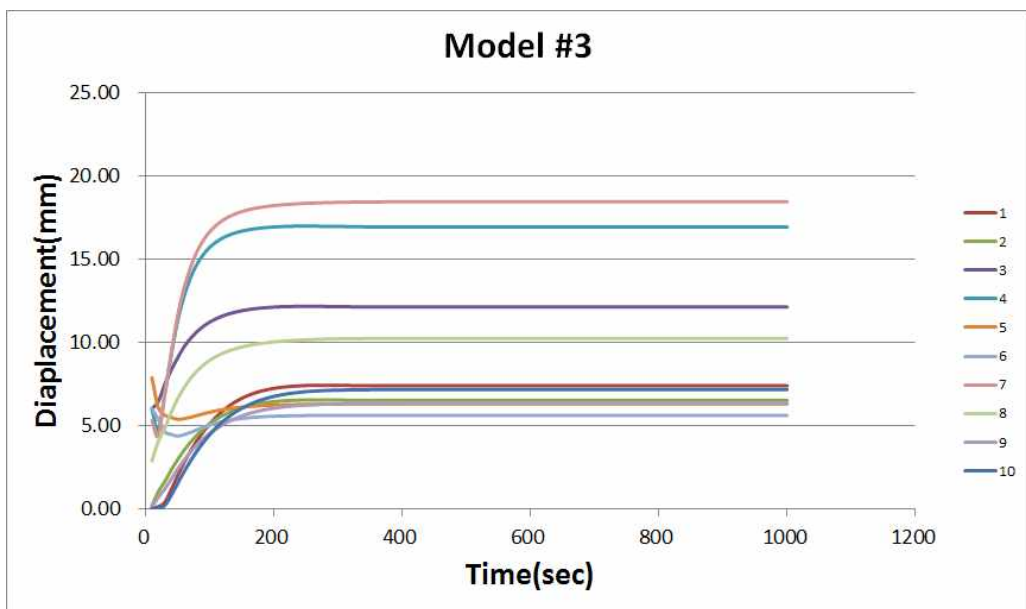
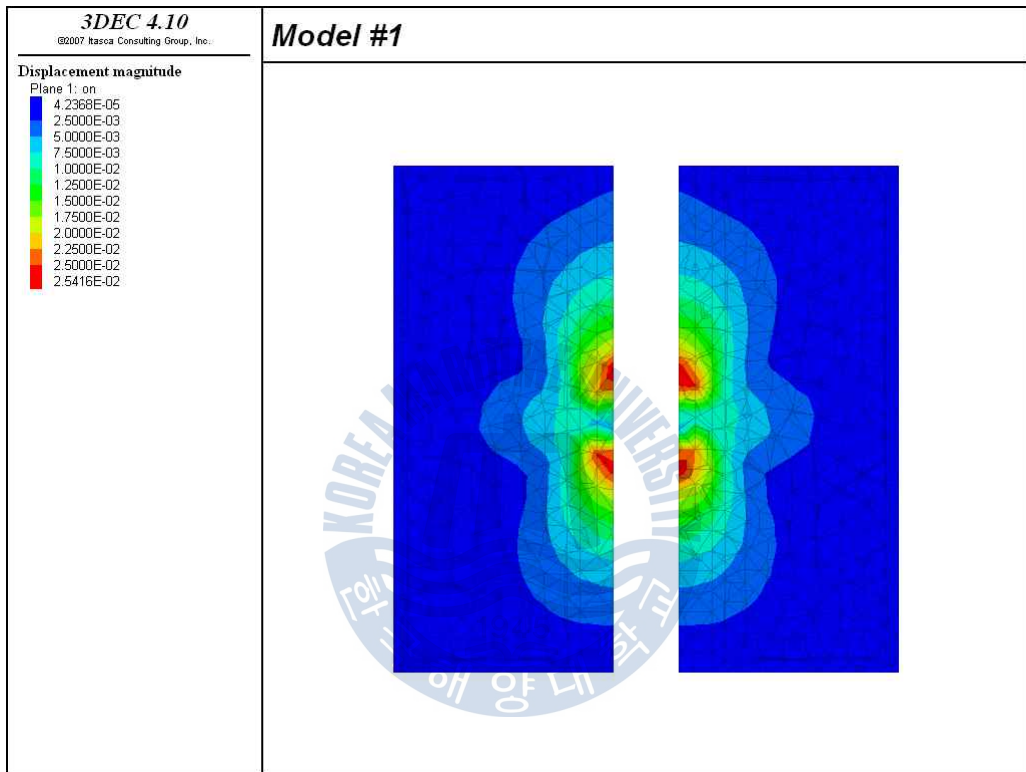


Fig. 12 Displacement verse time for hydraulic fracturing of numerical modeling results



Fig. 13은 수치해석 모델링이 끝난 후의 모습이며 수압파쇄 시험 결과와 비교하여 보았을 때 변위의 분포양상이 비교적 잘 일치한 결과를 보이고 있다. 이에 따라 3DEC를 이용한 수치해석 모델링이 수압파쇄 시험을 구현할 수 있는 적합한 방법이라고 사료된다.



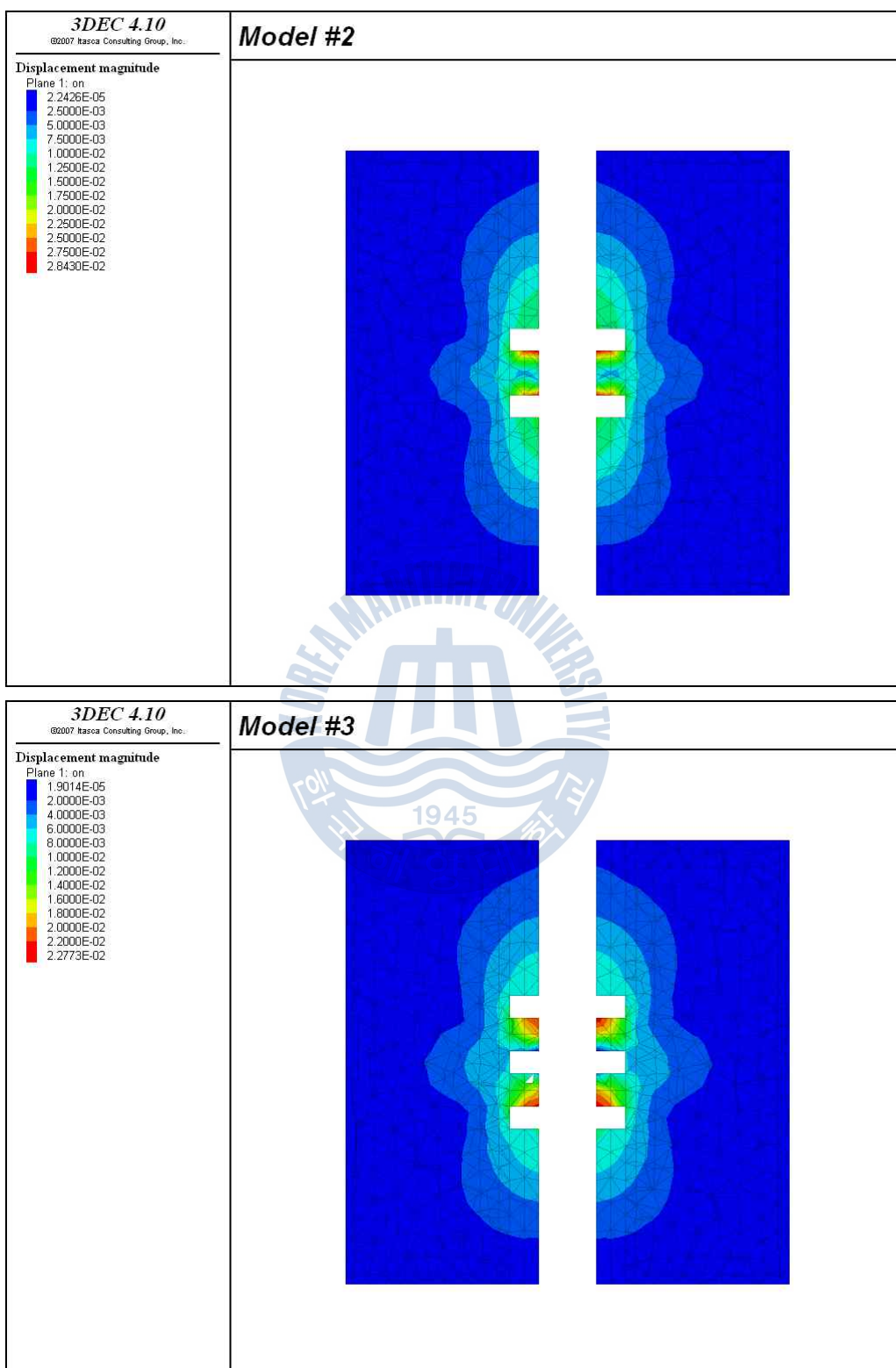


Fig. 13 Numerical modeling results

제 5 장 결 론

본 연구에서는 실내 수압파쇄시험을 실시하여 유도홈이 있는 경우와 없는 경우를 비교·분석하여 유도홈에 따른 균열의 발전양상에 대하여 파악하고 3차원 개별요소법에 근거한 3DEC을 사용하여 수압파쇄시험을 수치적으로 모사했다. 기초물성 및 실내시험과 수행된 수압파쇄시험 결과의 역산을 통해 얻은 시험편의 역학적 물성을 이용하여 수치해석 결과를 획득하고, 실험실 수압파쇄시험과 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 도출 할 수 있었다.

1. 수압파쇄 시험의 결과 유도홈이 없는 경우 균열의 발생압력이 40.27Mpa, 유도홈이 2개인 경우 8.13Mpa, 유도홈이 3개인 경우 7.04Mpa로 유도홈이 있는 경우가 유도홈이 없는 경우에 비해 최대 약 80%까지 감소하였다. 따라서 현장에서 수압파쇄를 실시할 때 유도홈을 이용하면 효과적인 균열 발생 결과를 나타낼수 있을 것이라 사료된다.
2. 수치해석 결과 발생하는 변위를 살펴보면 유도홈이 없는 경우 노즐외곽에서 최대변위 21.06mm와 21.86mm가 발생하며 패커에 가까울수록 감소한다. 유도홈이 2개인 경우 유도홈과 유도홈 사이에서 13.49mm, 유도홈이 3개인 경우 유도홈과 유도홈 사이에서 16.96mm와 18.43mm로 유도홈이 있는 경우 유도홈과 유도홈 사이의 변위가 가장 많이 발생하였다. 따라서 유도홈 개수가 증가할수록 균열발생의 효율이 높아질 것으로 사료된다.
3. 3차원 수치해석 프로그램인 3DEC를 이용하여 수압파쇄 모델을 구현할수 있었으며, 이를 토대로 실제 수압파쇄 시험을 하기에 앞서 현장의 지반물성을 토대로 균열의 발생 압력을 추정하는 것이 가능하다고 사료된다.

4. 실제로 발생하는 균열의 양상을 표현하기 위해서는 균열의 분포를 구체적으로 표현할수 있는 방법이 추가적으로 필요할 것으로 사료되며, 본 연구 결과를 이용하여 실제 현장에서의 균열의 발생 압력 및 균열의 발전 양상을 3차원 수치해석을 통해 보다 정확하게 구현할 수 있을 것으로 사료된다.



참고문헌

- 김극태, 정건용, 박정규, 2014. *비전통자원개발에 따른 수처리 최신 기술*. 화학 공학회지 52(2), pp.154-165
- 이희근, 1995. *수압파쇄법을 이용한 지열 에너지 개발에 관한 연구*, 한국과학 재단
- 천대성, 이태중, 2013. *석유가스생산을 위한 수압파쇄기술 설계 이론과 실제*. 한국암반공학회지, 23(6), pp.538-546
- 최성웅, 2000. *Rock bridges를 고려한 수치 해석적 수압파쇄 균열거동 연구*. 한국암반공학회지, 10, pp. 447-456
- 최성웅, 2011. *수압파쇄 균열폐쇄압력 산정을 위한 수치해석 연구*. 한국암반공학회지, 21(2), pp. 128-137
- 최성웅, 이희근, 1995. *인공슬롯을 고려한 수압파쇄 균열의 발전양상에 관한 연구*. 한국암반공학회지, 5, pp.521-265
- 한국암반공학회, 2005. *암반공학 수치해석*, 서우출판사
- Al-Busaidi, A., Hazzard, J.F., Young, R.P., 2005, *Distinct element modeling of hydraulically fractured Lac du Bonnet granite*, Journal Geophysical Reserch 110, B06302, DOI:10.1029/2004JB003297.
- Boone, T.J., Ingraffea, A.R., Roegiers, J.C., 1991, Simulation of hydraulic fracture propagation in poroelastic rock with application to stress measurement techniques, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech

Abstr., 28(1), pp.1-14

Hazzard, J.F., Young, R.P, Maxwell, S.C., 2000 *Micromechanical modeling of cracking and failure in brittle rocks*, J. Geophys. REs., 105(B7), 16683-97

Haimson, B. C. and C. Fairhurst, 1967, *Initiation and extension of hydraulic fracture in rocks*, SPE, 7, pp.301-318

Hubbert, M. K and D. G. Willis, 1957, *Mechanics of hydraulic fracturing*, Trans. AIME., 201, pp.153-163

Ishida, T., 2001, *Acoustic emission monitoring if hydraulic fracturing in laboratory and field*, Construction and Building Materials, 15, pp.283-295

Itasca Consulting Group, INC., 2007. *3DEC-Theory and Background*. Version 4.1, Minneapolis:ICG.

Ito, T., and Hayashi. K., 1991, *Physical background to the breakdown pressure in hydraulic fracturing tectonic stress measurements*, Int. J. Rock Mech Min. Sci. & Geomech Abstr., 28(4), pp285-293

Lockner, D., Byerlee, J.D., 1977, *Hydrofracture in Weber sandstone at high confining pressure and differential stress*, J. Geophys. Res., 82(14), pp.2018-2026

Rummel, F., 1987, '*Fracture mechanics approach to hydraulic fracturing stress measurements*'. Fracture mechanics of rock, Academic press, pp.217-239

Shimizu, H., Murata, S., Ishida, T., 2011, *The distinct element analysis for hydraulic fracturing in hard rock considering fluid viscosity and*

particle size distribution, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 48, pp.712-727

Zoback, M.D., F. Rummel, R. Jung and C.B. Raleigh, 1977, *Laboratory hydraulic fracturing experiments in intact and pre-fractured rock*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 14, pp.49-58

